寄生取食 Cry1Ab 杀虫蛋白的粘虫幼虫对伞裙追寄蝇寄生率及生长发育的影响

杨海霞[1,2], 程云霞[1], 张 蕾[1], 牛长缨[2], 罗礼智[1,*]

(1. 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;
2. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070)

摘要:【目的】研究取食含 Cry1Ab 杀虫蛋白饲料的粘虫 *Mythimna separata* (Walker)对其寄生天敌伞裙追寄蝇 *Exorista civilis* Rondani 的寄生率、生长发育和产卵量的影响。【方法】以取食含不同浓度(0, 3.125, 6.25, 12.5 和 25 μg/g) Cry1Ab 杀虫蛋白饲料的粘虫幼虫为寄主, 观察并记录伞裙追寄蝇的寄生和生长发育等指标。【结果】取食过不同浓度 Cry1Ab 蛋白的粘虫对伞裙追寄蝇寄生率、产卵量没有显著的影响($P \geqslant 0.05$), 即不会影响寄生蝇对寄主的选择。取食这 5 种浓度杀虫蛋白的粘虫上寄生的伞群追寄蝇发育历期(卵-幼虫、蛹、成虫产卵和世代)、羽化率、性比和产卵量均无显著差异($P \geqslant 0.05$), 但对蝇蛆存活率和蛹重影响显著($P < 0.05$)。其中, 伞裙追寄蝇蝇蛆存活率以寄生在取食 3.125 μg/g Cry1Ab 蛋白的粘虫上的最高(33%), 并显著高于对照和其余 3 个浓度处理($P < 0.05$), 但这 4 个处理之间的存活率差异不显著($P \geqslant 0.05$)。伞裙追寄蝇的蛹重随寄主取食 Cry1Ab 杀虫蛋白含量的增加而显著下降($P < 0.05$)。其中对照的蛹重为 49.8 mg, 而寄生于取食 6.25 和 25 μg/g 蛋白寄主上的蛹重分别只有 41.0 和 36.7 mg。【结论】本实验结果表明寄主粘虫取食 Cry1Ab 蛋白对伞裙追寄蝇无显著负面影响, 为科学评价田间转 Bt 基因作物对寄生蝇的影响作用提供了重要的科学依据。

关键词: 伞裙追寄蝇; 粘虫; Cry1Ab 杀虫蛋白; 寄生; 生长发育; 存活率

中图分类号: Q965.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2013)10-1166-08

Performances of tachinid fly *Exorista civilis* (Diptera: Tachinidae) parasitizing host *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae fed with Cry1Ab toxin

YANG Hai-Xia[1,2], CHENG Yun-Xia[1], ZHANG Lei[1], NIU Chang-Ying[2], LUO Li-Zhi[1,*] (1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract:【Aim】To demonstrate the effect of transgenic Bt-crop on the bionomics of the tachinid fly *Exorista civilis* Rondani, the parasitism rate and life history parameters of *E. civilis* developed from larvae of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker), fed on artificial diets with Cry1Ab toxin were investigated in laboratory.【Methods】*M. separata* larvae were fed on diets containing 0, 3.125, 6.25, 12.5 and 25 μg/g of Cry1Ab toxin, respectively, and used as the host for *E. civilis*. The parameters related to the parasitism and the growth and development of *E. civilis* on the host were observed and recorded.【Results】The results showed that the parasitism rate and fecundity of the fly on *M. separata* larvae feeding on diets containing various doses of Cry1Ab protein were insignificantly different ($P \geqslant 0.05$), suggesting that host selective behavior of the *E. civilis* is not affected by the dose of Bt-toxin in the caterpillar. The developmental period (egg-larva, pupa, adult oviposition and generation), emergence rate, sex ratio, and fecundity of *E. civilis* developed from *M. separata* larvae treated by various concentrations of Cry1Ab toxin were insignificantly different ($P \geqslant 0.05$). However, the survival rate of the maggots in the host feeding on diet containing 3.125 μg/g of Cry1Ab toxin was significantly greater than that of the control and the rest treatments ($P < 0.05$), while insignificantly different among

基金项目: 转基因生物新品种培育重大专项(2009ZX0809211-018B)

作者简介: 杨海霞, 女, 1987 年生, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事 Cry1Ab/Ac 杀虫蛋白对粘虫及其寄生天敌风险评价的研究, E-mail: yanghaixia1203@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lzluo@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2013-04-12; 接受日期 Accepted: 2013-09-19

the remained 4 treatments ($P \geqslant 0.05$). The pupal weight significantly declined as the concentration of Cry1Ab toxin fed by their hosts increased ($P < 0.05$). The pupal weight in the control group was 49.8 mg, while that in treatment groups of 6.25 and 25 μg/g Cry1Ab toxin was only 41.0 and 36.7 mg, respectively. 【Conclusion】 These results indicate that parasitizing host *M. separata* larvae fed with Cry1Ab toxin has no dramatically negative effect on parasitoid *E. civilis*. This study provides a basis for the evaluation of the risk of transgenic Bt-crops on the tachinid parasitoids in fields.

Key words: *Exorista civilis*; *Mythimna separata*; Cry1Ab toxin; parasitism; growth and development; survival rate

转 Bt 基因作物对非靶标害虫尤其是天敌昆虫的影响目前备受关注并且争议较多。捕食天敌直接取食转 Bt 基因玉米花粉(Zwahlen *et al*., 2000, Duan *et al*., 2002)，或捕食取食过转 Bt 基因作物的害虫(Obrist *et al*., 2006, 施敏娟等, 2011)，其存活、发育、繁殖、捕食功能及田间的种群数量(Romeis *et al*., 2004; Sharma *et al*., 2007; 鲁黎明等, 2008)均未受到不利影响。然而转 Bt 基因作物对寄生蜂影响的研究结果并不一致。有研究显示，寄主取食转 Bt 作物对寄生蜂的生长发育、产卵量(Baur and Boethel, 2003)、寿命和寄生行为并无不利影响(Chilcutt and Tabashnik, 1999)；但也有研究认为，转 Bt 基因作物对寄生蜂幼虫的存活率、发育速率、成虫寿命等会产生明显的影响(Bemal and Boethel, 2002; Sanders *et al*., 2007)。因此转 Bt 基因作物对寄生天敌的影响复杂，会因转 Bt 基因作物及天敌种类的不同而异。如何科学地评价转 Bt 基因作物对寄生天敌的安全性依然面临着较大的挑战。

虽然粘虫 *Mythimna separata* (Walker)不是转 Bt 基因玉米的靶标害虫，但由于粘虫的发生危害范围广，同时还具有季节性远距离迁飞的特性，并经常在玉米、水稻和小麦等作物上暴发成灾(李光博, 1980)，因此粘虫的种群动态规律或其相应的天敌类群不可避免地受到转 Bt 基因作物影响。已有研究表明转 Bt 基因作物对粘虫具有防治效果(王冬妍等, 2004; 贠桂玲等, 2004)，但是，由于 Bt 杀虫蛋白在不同的转 Bt 基因玉米品系、发育阶段以及组织中的表达量差异很大(王冬妍等, 2004; 李葱葱等, 2006; 姜志磊等, 2008; 史晓利等, 2009)，而粘虫的取食危害规律又比较复杂，因此，所得的结论并不一致。为了克服这一问题，我们曾经报道过 Bt 杀虫蛋白对粘虫生长发育(蒋善军等, 2010)和蛋白酶的影响作用(解娜等, 2012)，取食过 Bt 蛋白的粘虫对淡足侧沟茧蜂生长发育的影响(张蕾等, 2011)。

肆虐的粘虫也极有可能会迁飞到转 Bt 基因作物田间进行取食和繁殖。因此寄生天敌在寄生过程中，就可能会有部分 Bt 杀虫蛋白通过寄主昆虫，进入第三营养阶层天敌昆虫体内。寄生蝇是粘虫等重要害虫的寄生天敌(赵建铭, 1962; 林昌善, 1990)，但转 Bt 基因作物或者是 Bt 杀虫蛋白对寄生蝇的影响作用目前尚未知晓。为了阐明转 Bt 基因作物对寄生蝇种群动态规律的影响作用，为评价转 Bt 基因作物的生态风险提供更多的科学依据，本实验以粘虫为寄主，在室内条件下研究了伞裙追寄蝇——多种重要蛾类害虫的优势寄生天敌(赵建铭, 1962; 刘银忠等, 1998; 李红等, 2008)对取食过不同浓度 Cry1Ab 杀虫蛋白的粘虫的寄生率，以及对寄生蝇的生长发育、存活率及生殖能力的影响。

1　材料与方法

1.1　实验虫源、饲养条件及杀虫蛋白

所用粘虫采自河北康保(41.87°N, 114.6°E)第 1 代迁入成虫。幼虫用本实验室所研制的专利人工饲料和饲养技术(201010197333.X)饲养，成虫用 5% (v/v)的蜂蜜水群体饲养，喂饲期间每天更换蜂蜜水，用谷草杆采卵。幼虫化蛹 5 d 后，将蛹取出放在养虫箱中(40 cm × 80 cm)饲养。羽化第 5 天插入谷杆供成虫产卵。最后收集卵块，进行孵化。如此逐代循环繁殖。所用伞裙追寄蝇同样采自河北省康保县。伞裙追寄蝇以粘虫或甜菜夜蛾幼虫为寄主进行饲养(陈海霞和罗礼智, 2007)。成虫以 10% (v/v)的蜂蜜水群体饲养。粘虫和寄生蝇均在 23 ± 1℃，光周期为 14L∶10D，相对湿度为 70% 左右的条件下饲养。

实验所用的 Cry1Ab 蛋白(纯度 > 98%)购自美国一龙公司。根据 Bt 杀虫蛋白在转 Bt 基因玉米不同发育阶段和组织中含量的变化(王冬妍等, 2004;

李葱葱等, 2006; Wu *et al*., 2007; 姜志磊等, 2008; 史晓利等, 2009), 以及粘虫对玉米的取食危害规律(李光博, 1979), 实验共设 5 个浓度处理, 依次为 0 (CK), 3.125, 6.25, 12.5 和 25 μg/g, 以 0.1 mmol/L pH 10.0 的碳酸钠溶液溶解后配制所需要的浓度(逐级稀释), 加入人工饲料中混合均匀。

1.2 寄生蝇寄生能力的确定

将粘虫置于 12 孔细胞培养板(孔径 3.0 cm × 2.0 cm, 美国 Corning 公司)中以人工饲料单头饲养至 6 龄, 然后将其转置 6 孔板(孔径 3.0 cm × 4.0 cm)中分别喂以含有上述不同浓度的 Cry1Ab 蛋白的人工饲料。将取食 2 d 后的 10 头幼虫置于配有 1 对 5 日龄寄生蝇的养虫箱中。每个浓度重复 5 次, 共 50 头幼虫。24 h 后将幼虫取出, 根据幼虫体表上寄生蝇卵粒的有无及数量的多少分别统计寄生率和平均着卵量。寄生率的计算公式为: 寄生率 = (被寄生粘虫数/观察粘虫总数) ×100% 。

1.3 对寄生蝇生长发育的影响

为了避免粘虫蜕皮时将附着于表皮的寄生蝇卵粒一起蜕掉(陈海霞等, 2007), 提高寄生蝇与粘虫建立寄生关系的可能性, 将 6(末)龄粘虫置于盛有寄生蝇成虫的养虫箱中, 待幼虫被寄生 1 次, 即虫体上附有一粒寄蝇卵后取出。为了保证实验所需的寄生蝇数量, 0, 3.125 和 6.25 μg/g 处理的分别获取 200 头左右的寄主幼虫, 而 12.5 和 25 μg/g 处理的分别获取 300 和 400 头寄主幼虫(3 个重复)。被寄生的粘虫置于 6 孔板中用含不同 Cry1Ab 蛋白的人工饲料继续饲养至寄主幼虫化蛹。之后, 逐日观察寄生蝇的发育情况。待寄生蝇蝇蛆从寄主体内钻出、化蛹、羽化和产卵之时, 分别计算卵至幼虫、蛹、成虫产卵和世代发育历期。

1.4 对寄生蝇存活率、蛹重、成虫性比和产卵量的影响

为了明确 Cry1Ab 杀虫蛋白对寄生蝇蝇蛆存活率和个体大小的影响作用, 待寄生蝇老熟幼虫从寄主中释出并化蛹后, 分别计算寄生蝇蝇蛆存活率, 称量蛹重。寄生蝇蝇蛆存活率方法为: 出蛹率 = (寄生蝇蛹数/观察的寄主幼虫总数) ×100% 。蛹重的称量是在寄生蝇幼虫化蛹后的第 2 天, 用精度为 0.0001 g 的 ER182A 电子天平(日本 A&D 公司)分别称量。

寄生蝇羽化为成虫后, 根据成虫的形态特征计算雌雄虫比例。并将成虫配对置于盛有 10% 蜂蜜水的养蝇箱中饲养, 每日更换蜂蜜水。从第 2 天开始放入 3 ~5 头高龄粘虫幼虫供寄生蝇产卵。每天更换幼虫并观察记录寄生蝇的产卵情况, 最后统计成虫的产卵前期和产卵量。

1.5 数据统计与分析

实验所得数据用平均数 ± 标准误(*SE*)表示。除了寄生蝇雌雄成虫比例的差异显著性采用卡方(χ^2)测验之外, 其余参数处理间的差异显著性在经方差分析(ANOVA)之后采用 Tukey 氏 HSD 方法比较确定, 其中寄生率、化蛹率、羽化率在统计前均转化为百分数据。分析的显著水平为 $P<0.05$, 所用统计软件为 SPSS 16.0。

2 结果分析

2.1 Cry1Ab 杀虫蛋白对伞裙追寄蝇寄生能力的影响

6 龄粘虫取食不同浓度 Cry1Ab 杀虫蛋白 2 d 后对伞裙追寄蝇寄生情况的研究(图 1)表明, 5 个处理中的寄生率分别为 73%, 67%, 65%, 72% 和 71%, 没有显著差异($F=3.353$, $P=0.054$)。

图 2 为被寄生过的粘虫体上的寄生蝇卵的统计结果, 伞裙追寄蝇在对照粘虫上的产卵量最高, 平均为 2.7 粒, 而在取食了 4 种浓度 Cry1Ab 蛋白的粘虫上的平均产卵量, 从低到高, 依次为 2.3, 2.5, 2.3 和 1.9 粒, 但差异同样不显著($F=0.860$, $P=0.488$)。

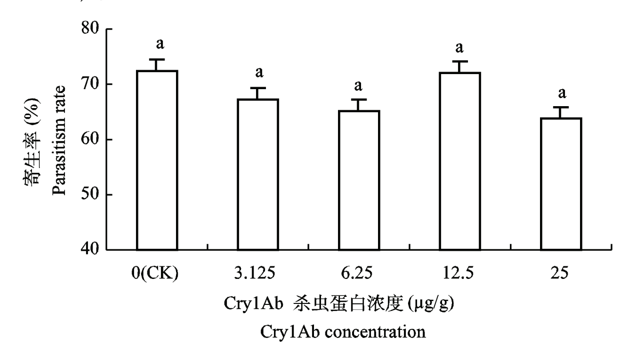


图 1 Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇寄生率的影响

Fig. 1 Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on parasitism rate of *Exorista civilis*

图中数据为平均值 ± 标准误; 柱上不同字母表示 Tukey 氏 HSD 多重比较差异显著($P<0.05$); 图2 ~5, 7 同。Data in the figure are mean ± *SE* and different letters above bars indicate significant difference at the 5% level by Tukey's HSD test. The same for Figs. 2 –5, 7. 从左至右样本数依次为 51, 49, 46, 50 和 47。The sample size from left to right is 51, 49, 46, 50 and 47, respectively.

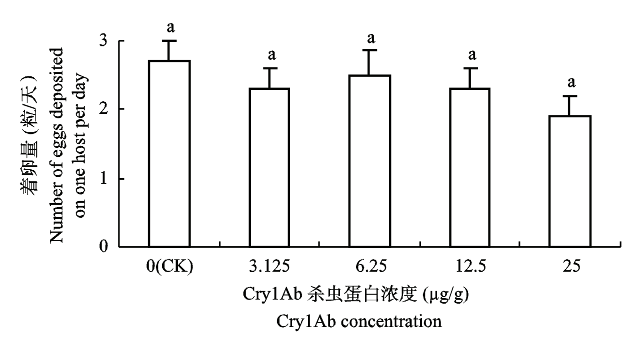


图 2　Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇平均着卵量的影响

Fig. 2　Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on the number of eggs deposited on one host by *Exorista civilis*

从左至右样本数依次为 51，49，46，50 和 47。The sample size from left to right is 51，49，46，50 and 47，respectively.

2.2　Cry1Ab 杀虫蛋白对伞裙追寄蝇发育历期的影响

表 1 结果表明，在取食不同浓度 Cry1Ab 杀虫蛋白的寄主粘虫幼虫上生长的伞裙追寄蝇发育历期虽然存在一些差异，但均没有显著的差异。各处理的卵-幼虫发育历期为 9.0 ~ 9.3 d（$F=0.365$，$P=0.833$）；对照组的蛹期长于 4 个处理组（$F=1.313$，$P=0.268$）；4 个处理组的产卵前期比对照组约延长了 0.4 ~ 0.6 d（$F=0.970$，$P=0.431$）；5 个处理的世代发育历期均在 29 d 左右（$F=0.201$，$P=0.937$）。

表 1　Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇发育历期（d）的影响

Table 1　Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on the developmental duration（d）of *Exorista civilis*

发育历期 Developmental duration	Cry1Ab 蛋白浓度 Cry1Ab concentration（μg/g）				
	0（CK）	3.125	6.25	12.5	25
卵-幼虫期 Egg to larva	9.3 ± 0.2 a（39）	9.3 ± 0.1 a（54）	9.2 ± 0.2 a（22）	9.0 ± 0.2 a（25）	9.1 ± 0.2 a（20）
蛹期 Pupal period	13.3 ± 0.2 a（37）	13.1 ± 0.1 a（47）	13.1 ± 0.2 a（21）	12.7 ± 0.2 a（22）	13.1 ± 0.2 a（18）
产卵前期 Preoviposition period	5.2 ± 0.2 a（20）	5.6 ± 0.3 a（22）	5.8 ± 0.4 a（15）	5.8 ± 0.4 a（14）	5.8 ± 0.4a（14）
世代 Generation	28.6 ± 0.4 a（20）	28.8 ± 0.5 a（22）	28.9 ± 0.4 a（15）	29.1 ± 0.7 a（14）	29.1 ± 0.6 a（14）

表中数据为平均数 ± *SE*；括号中的数据为样本数；在同一行数据中具有不同字母的为 Tukey 氏 HSD 比较差异显著（5% 水平）。Data are presented as mean ± *SE*. Numbers in parentheses are the sample size. Data in the same row sharing different letters are significantly different at the 5% level by Tukey's HSD test.

2.3　Cry1Ab 杀虫蛋白对伞裙追寄蝇存活率（化蛹率、羽化率）和蛹重的影响

寄生蝇在取食不同浓度 Cry1Ab 杀虫蛋白的寄主粘虫上的存活率（图 3）有显著差异（$F=90.168$，$P=0.023$）。其中以在取食含有 3.125 μg/g 饲料的粘虫上的蝇蛆存活率最高，因为该浓度下有 33% 的老熟蝇蛆个体从粘虫寄主体中释出并成功化蛹。其次是对照，为 17%，而在取食 6.25，12.5 和 25 μg/g 的寄主上的存活率依次为 15%，15% 和 11%。统计分析的结果显示，在取食 3.125 μg/g 的粘虫上发育的寄生蝇存活显著高于 CK 和取食其他浓度的。但是，对照组与其他浓度处理之间，以及其余 3 个处理组之间的寄生蝇蝇蛆存活率没有显著差异。

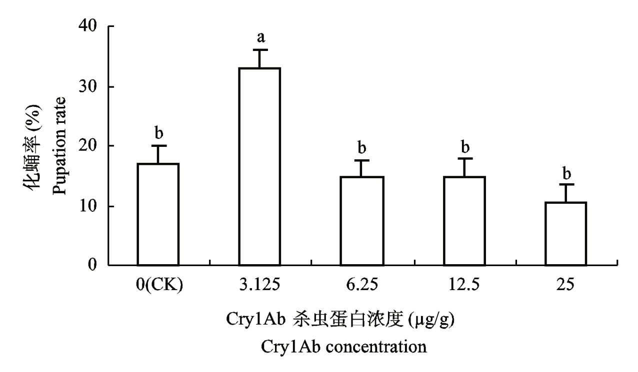


图 3　Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇化蛹率的影响

Fig. 3　Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on the pupation rate of *Exorista civilis*

从左至右样本数依次为 229，182，240，273 和 418。The sample size from left to right is 229，182，240，273 and 418，respectively.

对 5 个处理的成虫羽化率进行统计的结果(图 4)表明，取食含不同浓度 Cry1Ab 杀虫蛋白的寄主对寄生蝇的羽化率没有显著影响($F=1.894$，$P=0.151$)，尽管不同处理的寄蝇羽化率最大差距可达 10%。

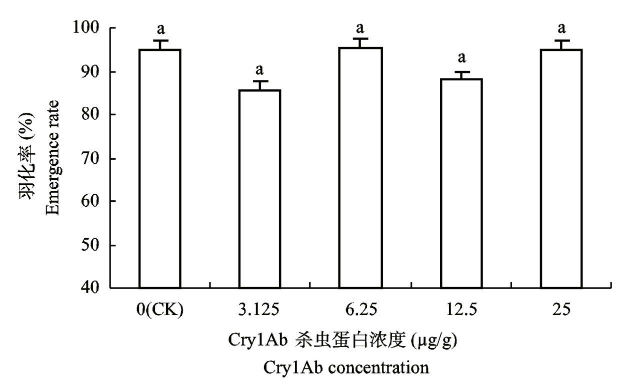


图 4 Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇成虫羽化率的影响

Fig. 4 Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on emergence rate of *Exorista civilis*

从左至右样本数依次为 39，60，36，41 和 46。The sample size from left to right is 39, 60, 36, 41 and 46, respectively.

在取食不同浓度的 Cry1Ab 杀虫蛋白的寄主上发育而成的寄生蝇蛹重(图 5)有显著的差异($F=7.448$，$P=0.035$)。其中以 CK 组的寄生蝇蛹最重，为 49.8 mg，其他各处理组的蛹重则随寄主取食 Cry1Ab 蛋白浓度的增加而减小，分别为 45.3，41.0，37.8 和 36.7 mg。结果表明，CK 与取食 3.125 μg/g 处理的蛹重差异不显著，但与 6.25，12.5 和 25 μg/g 3 个较高浓度处理之间差异显著。

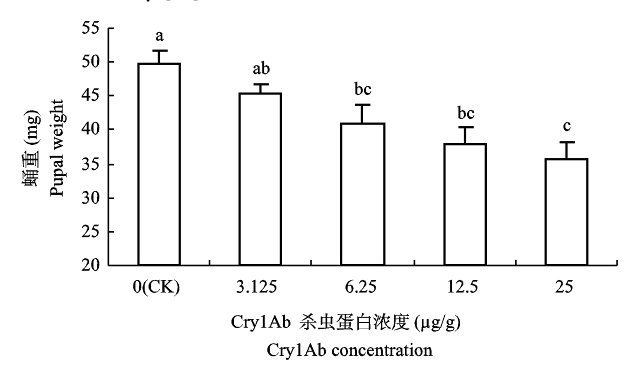


图 5 Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇蛹重的影响

Fig. 5 Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on pupal weight of *Exorista civilis*

从左至右样本数依次为 39，60，36，41 和 46。The sample size from left to right is 39, 60, 36, 41, and 46, respectively.

2.4 Cry1Ab 杀虫蛋白对伞裙追寄蝇成虫性比及雌虫产卵量的影响

图 6 显示，寄生蝇的雌雄比有随寄主取食 Cry1Ab 蛋白浓度的增加而下降的趋势。如 CK 组雌蝇比例为 54%，而处理组的雌蝇比例，由低浓度到高浓度依次为 42%，43%，39% 和 32%。其中在取食 25 μg/g 蛋白的寄主上发育的雌蝇比例比对照的少了 22%。但是，这些差异并不显著($\chi^2=3.237$，$P=0.519$)。

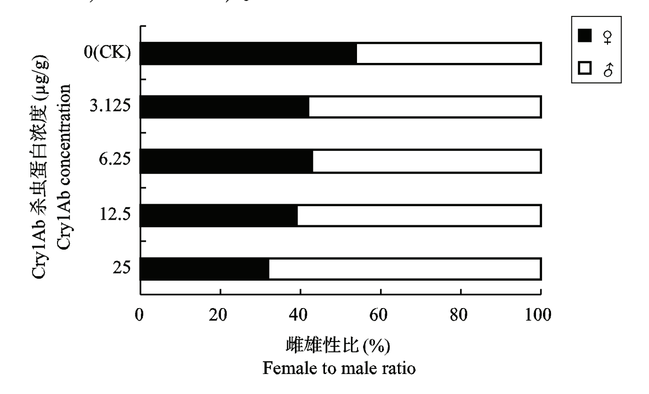


图 6 Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇成虫性比的间接影响

Fig. 6 Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on sex ratio of *Exorista civilis*

图中数据为卡方检验差异不显著($P>0.05$)；从左至右样本数依次为 20/17，22/30，15/20，14/22 和 14/30。Data in the figure are not significantly different at the 5% level by Chi-square test. The sample size from left to right is 20/17, 22/30, 15/20, 14/22 and 14/30, respectively.

此外，由取食不同浓度 Cry1Ab 蛋白的寄主上发育而成的寄生蝇产卵量(图 7)存在一定的差异。其中以 25 μg/g 处理的产卵量最多，为 143 粒，CK 的次之，为 140 粒,其余 3 个处理的随 Cry1Ab 蛋白浓度的增加而下降，依次为 137，138 和 129 粒。但是，这些差异并不显著 ($F=0.297$，$P=0.879$)。

3 讨论

本实验研究表明，寄主粘虫取食杀虫蛋白与否或多少均不会影响伞裙追寄蝇对寄主识别能力和选择行为。产生这些结果的真正原因目前尚不十分清楚。较可能的原因是：寄生蝇主要是通过视觉选择寄主，即通过寄主的大小和活跃程度确定是否选择产卵寄主(Stireman，2002；和晓波等，2010)，而由于所用的粘虫大小相似，而室内取食不同浓度的 Bt

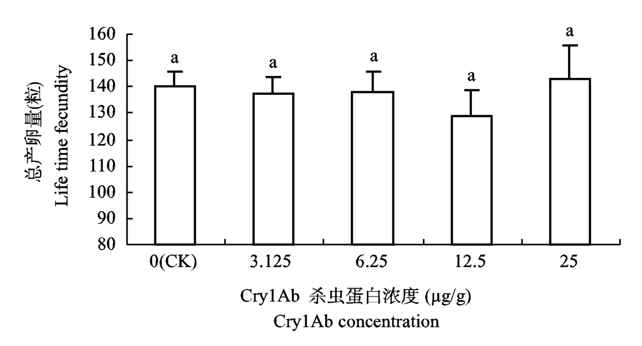


图 7　Cry1Ab 杀虫蛋白通过粘虫寄主对伞裙追寄蝇总产卵量的影响

Fig. 7　Effects of Cry1Ab through host *Mythimna separata* on the total number of eggs laid by *Exorista civilis*

从左至右样本数依次为 20，22，15，14 和 14。The sample size from left to right is 20, 22, 15, 14 and 14, respectively.

蛋白的活跃程度受到的影响不明显。在田间，寄生天敌会通过寄主取食植物而诱导植物产生的挥发物质对寄主进行定位和攻击，已有报道表明转 Bt 基因作物经害虫诱导后，其挥发物成分和含量均有变化(Turlings *et al.*, 2005)，但是对寄生性天敌的搜寻寄主能力并无影响(Chilcutt and Tabashnik, 1999)。本实验是在室内用饲料进行的研究，所以没有考虑植物挥发物质的影响，且定时定量饲喂毒蛋白可能会使粘虫的活跃程度与田间有所差异。所以，在今后的实验中，如果能结合分子生物学和昆虫行为学手段并更好地协调利用外源 Bt 抗虫资源和玉米内源抗虫挥发性物质，将会为进一步探究田间的转基因作物-害虫-天敌三重营养关系的提供科学依据。

本实验中粘虫取食的杀虫蛋白浓度为 3.125 ~ 25 μg/g，均高于转基因抗虫玉米品种 MON810 和 Bt11 的心叶组织中的 Bt 蛋白的表达量(王冬妍等, 2004)。其中 25 μg/g 的浓度分别是这两个抗虫品种的 13 倍 (1.88 μg/g) 和 17 倍(1.47 μg/g)，但实验结果表明伞裙追寄蝇的发育速度、羽化率和性比等均不会受到影响。这与 Bt 杀虫蛋白对寄生蜂的间接影响结果不一致：取食过杀虫蛋白的粘虫对淡足测沟茧蜂 *Microplitis pallidipes* 卵-幼虫发育历期延长，成蜂体重下降(张蕾等, 2011)；取食了转 Bt 基因棉的寄主上发育的寄生蜂 *Campoletis chlorideae* 的结茧率和成虫羽化率会明显下降(Sharma *et al.*, 2007)。伞裙追寄蝇只能将卵产于寄主表面，与寄生蜂有效的将抗免疫生理液体随卵直接注入寄主幼虫体内的模式并不相同(Stireman *et al.*, 2006)。因此，寄生蝇与寄生蜂对 Bt 杀虫蛋白的适应机理与敏感程度差异较大可能是客观存在的。

粘虫取食 3.125 μg/g 浓度 Bt 蛋白能够显著提高伞裙追寄蝇的蝇蛆存活率，而取食高浓度蛋白的粘虫不会影响寄生蝇的存活率。低浓度 Bt 蛋白能够提高寄生蝇存活率的可能原因是，Bt 蛋白的存在抑制或干扰了粘虫的免疫系统，影响了其血细胞种类和总量(刘崇乐和傅贻玲, 1964)，从而弱化了其对寄生蝇的免疫反应，使寄生蝇幼虫的存活率增加：首先，对于伞裙追寄蝇这样的大卵生寄生蝇而言，只能依靠钻入寄主体内蝇蛆的免疫能力的获得或者是寄主免疫能力的减弱。其次，取食过 Bt 蛋白的粘虫血细胞数量减少(作者，未发表数据)、解毒酶和保护酶活性下降(解娜等, 2012)都是寄主免疫能力下降的表征。另外，取食高浓度 Bt 蛋白的粘虫死亡率增加(作者，未发表数据)，则有可能是寄生蝇在取食高浓度 Bt 蛋白的寄主上存活率没有增加的直接原因。这与寄生蜂在取食了 Bt 蛋白的小菜蛾敏感品系中死亡率较高，而在抗性品系中存活率显著增加(Schuler *et al.*, 1999)的道理大体相同。然而，想真正了解伞裙追寄蝇的免疫机制，还应结合生理生化实验进行进一步研究。

寄主粘虫取食 Cry1Ab 杀虫蛋白后，寄生蝇的蛹重随杀虫蛋白含量的增加而下降(图 5)，但成蝇的产卵量则没有显著影响(图 7)。蛹重随寄主取食杀虫蛋白含量的增加而下降的原因可能是寄生蝇与寄生蜂一样，其所需的营养完全来自于寄主体内(Lafferty *et al.*, 2006)，而杀虫蛋白影响了寄主的取食量，或抑制了寄主的消化功能，如中肠蛋白酶活性(解娜等, 2012)，产生了拒食效应，从而使寄主营养供应不足所引起的。而伞裙追寄蝇产卵量与蛹重的关系不密切或不受寄主取食杀虫蛋白含量影响的可能原因是由于伞裙追寄蝇是一种广寄生种类(刘银忠等, 1998；李红等, 2008)，即其蛹重虽然会随寄主的大小不同而异，但成虫产卵量不会受到影响。另外，经室内观察验证，寄主的个体大小和营养成分会影响其蛹重，但不一定影响其产卵量。本实验中虽然 25 μg/g 处理的寄蝇蛹重只有 37.6 mg，但比寄主是草地螟的蝇蛹要大得多，且产卵量也无差异(未发表数据)。

综上所述，取食了 Bt 杀虫蛋白的粘虫对寄生蝇的寄主选择行为，各个虫态、以及世代发育历期，性比、羽化率、产卵量等均没有显著的影响；蝇蛆在取食了低浓度 Bt 蛋白寄主上的存活率为对照的 2 倍，而在其他取食高浓度 Bt 蛋白的粘虫寄

主上的存活率没有显著差异；寄生蝇蛹重会随寄主取食 Bt 蛋白含量的增加而下降。据此，可初步认为如果转 Bt 基因作物表达适当浓度的杀虫蛋白，不仅可以有效控制粘虫（王冬妍等，2004；贠桂玲等，2004；蒋善军等，2010），对伞裙追寄蝇也是安全的，甚至可能会促进这些寄生蝇种群的发展。虽然这些结果可为转 Bt 基因作物对寄生蝇的生态风险评估，乃至转 Bt 基因作物品种的培育都提供参考，但是，室内生测不能与田间转 Bt 基因玉米时空表达量和害虫危害时期对等，因而不能完全反映田间对寄生蝇种群动态的影响作用。只有结合田间转 Bt 基因玉米品系的种植、粘虫取食危害规律以及寄生蝇种群动态规律进行系统、长期和深入的研究，才能科学、客观地评估转 Bt 基因作物对寄生蝇的安全性。

参考文献（References）

Baur ME, Boethel DJ, 2003. Effect of Bt-cotton expressing Cry1A(c) on the survival and fecundity of two hymenopteran parasitoids (Braconidae, Encyrtidae) in the laboratory. *Biological Control*, 26(3): 325-332.

Bemal JS, Griset JG, Gillogly PO, 2002. Impacts of development on Bt maize-intoxicated hosts on fitness parameters of a stem borer parasitoid. *Journal of Entomological Science*, 37: 27-34.

Chen HX, Luo LZ, 2007. Host species, instar and position preference of a tachinid parasitoid, *Nemorilla maculosa* (Diptera: Tachinidae). *Acta Entomologica Sinica*, 50(11): 1129-1134. [陈海霞，罗礼智，2007. 双斑截尾寄蝇对寄主种类及草地螟幼虫龄期和寄生部位的选择性. 昆虫学报，50(11): 1129-1134]

Chilcutt CF, Tabashnik BE, 1999. Effects of *Bacillus thuringiensis* on adults of *Cotesia plutellae* (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Biocontrol Science and Technology*, 9: 435-440.

Duan JJ, Head G, Mckee MJ, Nickson TE, Martin JW, Sayegh FS, 2002. Evaluation of dietary effects of transgenic corn pollen expressing Cry3Bb1 protein on a non-target ladybird beetle *Coleomegilla maculata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 104: 271-280.

He XB, Zhang L, Pang XL, Luo LZ, 2010. The factors influencing host preference by tachinids. *Plant Protection*, 36(3): 39-42. [和晓波，张蕾，潘贤丽，罗礼智，2010. 影响寄生蝇寄主选择性因素研究进展. 植物保护，36(3): 39-42]

Jiang SJ, Luo LZ, Hu Y, Zhang L, 2010. Effects of Cry1Ac protein on growth and development, reproduction and flight potential of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 53(12): 1360-1366. [蒋善军，罗礼智，胡毅，张蕾，2010. Cry1Ac 毒蛋白对粘虫生长发育、繁殖及飞行能力的影响. 昆虫学报，53(12): 1360-1366]

Jiang ZL, Liu DP, Li XH, Kong XM, Li CC, Li FW, Sun CB, Yuan Y, 2008. Studies on the temporal and spatial expressions of Bt toxin protein of Bt transgenic maize. *Journal of Jilin Agricultural Science*, 33(6): 35-37. [姜志磊，刘德璞，李晓辉，孔祥梅，李葱葱，李飞武，孙传波，袁英，2008. 转基因抗虫玉米 Bt 毒蛋白的时空表达分析. 吉林农业科学，33(6): 35-37]

Lafferty KD, Dobson AP, Kuris AM, 2006. Parasites dominate food web links. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103(30): 11211-11216.

Li CC, Liu N, Kang LS, Wang D, Zhao HK, Zhang M, 2006. Study on the expression of Bt insecticidal protein of the transgenic insect-resistant corn. *Journal of Maize Sciences*, 14(3): 40-41. [李葱葱，刘娜，康岭生，王丹，赵洪锟，张明，2006. 转基因抗虫玉米 Bt 蛋白表达量的研究. 玉米科学，14(3): 40-41]

Li GB, 1979. Integrated pest management of the oriental armyworm. In: Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences ed. The Integrated Pest Management in China. Science Press, Beijing. 301-319. [李光博，1979. 粘虫的综合防治. 见：中国科学院动物研究所 主编. 中国主要害虫防治. 北京：科学出版社. 301-319]

Li GB, 1980. Occurence rule and control technology of the oriental armyworm. *Information Sciences in Argriculture*, (3): 3-37. [李光博，1980. 粘虫的发生规律和防治技术. 农业科技情报，(3): 3-37]

Li H, Luo LZ, Hu Y, Kang AG, 2008. Parasitism characteristics of two tachinid parasitoids *Exorista civilis* Rondani and *Nemorilla maculosa* Meigen (Diptera: Tachinidae) on the beet webworm, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 51(10): 1089-1093. [李红，罗礼智，胡毅，康爱国，2008. 伞裙追寄蝇和双斑截尾寄蝇对草地螟的寄生特性. 昆虫学报，51(10): 1089-1093]

Lin CS, 1990. The Ecology and Physiology of the Oriental Armyworm. Beijing University Press, Beijing. 528 pp. [林昌善，1990. 粘虫生理生态学. 北京：北京大学出版社. 528 页]

Liu CL, Fu YL, 1964. Identification of hemocytes types and pathological changes of *Pseudaletia separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 13: 542-551. [刘崇乐，傅贻玲，1964. 粘虫 *Pseudaletia separata* 血细胞类型辨识和病态变化. 昆虫学报，13: 542-551]

Liu YZ, Zhao JM, Li LF, Zhou SX, Wang HX, Zhang WJ, 1998. Records of Tachinids in Shanxi Province. Science Press, Beijing. 378 pp. [刘银忠，赵建铭，李林福，周士秀，王海啸，张伟基，1998. 山西省寄蝇志. 北京：科学出版社. 378 页]

Lu LM, Liu XP, Yin QY, Yang TZ, 2008. The impact of insect resistant transgenic tobacco on natural enemy community in fields. *Henan Agricultural Science*, (8): 62-64. [鲁黎明，刘小平，殷全玉，杨铁钊，2008. 转基因抗虫烟草对烟田天敌群落的影响. 河南农业科学，(8): 62-64]

Obrist LB, Klein H, Dutton A, Bigler F, 2006. Assessing the effects of Bt maize on the predatory mite *Neoseiulus cucumeris*. *Experimental and Applied Acarology*, 38: 125-139.

Romeis J, Dutton A, Bigler F, 2004. *Bacillus thuringiensis* toxin (Cry1Ab) has no direct effect on larvae of the green lacewing *Chrysoperla carnea* Stephens (Neuroptera: Chrysopidae). *Journal of*

Insect Physiology, 50: 175 – 183.

Sanders CJ, Pell JK, Poppy GM, Raybould A, Garcia-Alonso M, Schuler TH, 2007. Host-plant mediated effects of transgenic maize on the insect parasitoid *Campoletis sonorensis* (Hymenoptera: Ichneumonidae). *Biological Control*, 40: 362 – 369.

Schuler TH, Potting RPJ, Denholm I, Poppy GM, 1999. Parasitoid behaviour and *Bt* plants. *Nature*, 400: 825 – 829.

Sharma HC, Arora R, Pampapathy G, 2007. Influence of transgenic cottons with *Bacillus thuringiensis* Cry1Ac gene on the natural enemies of *Helicoverpa armigera*. *Biological Control*, 52: 469 – 489.

Shi MJ, Xie XQ, Jiang Q, Yang YZ, 2011. Impact on the life parameters and functional response of *Chrysoperla sinica* preying on *Spodoptera exigua* reared on transgenic Bt cotton. *Journal of Environmental Entomology*, 33(4): 482 – 487. [施敏娟, 谢修庆, 蒋晴, 杨益众, 2011. 取食转基因棉的甜菜夜蛾对草蛉生命参数与功能反应的影响. 环境昆虫学报, 33(4): 482 – 487]

Shi XL, Yang YZ, Cai JH, Zhang XL, Shi MJ, 2009. Bt toxic protein expression in insect-resistant transgenic corns and its transfer to and accumulation in *Ostrinia furnacalis*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20(11): 2773 – 2777. [史晓利, 杨益众, 蔡建华, 张晓丽, 施敏娟, 2009. Bt 毒蛋白在转基因抗虫玉米中的表达及在亚洲玉米螟中的转移积累. 应用生态学报, 20(11): 2773 – 2777]

Stireman JO, 2002. Host location and selection cues in a generalist tachinid parasitoid. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 103: 23 – 34.

Stireman JO III, O'Hara JE, Wood DM, 2006. Tachinidae: evolution, behavior, and ecology. *Annual Review of Entomology*, 51: 525 – 555.

Turlings TCJ, Jeanbourquin PM, Held M, Degen T, 2005. Evaluating the induced odour emission of a Bt maize and its attractiveness to parasitic wasps. *Transgenic Research*, 14: 807 – 816.

Wang DY, Wang ZY, He KL, Cong B, Bai SX, Wen LP, 2004. Temporal and spatial expression of Cry1Ab toxin in transgenic corn and its effects on Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* Guenée. *Scientia Agricultura Sinica*, 37(8): 1155 – 1159. [王冬妍, 王振营, 何康来, 丛斌, 白树雄, 文丽萍, 2004. Bt 玉米杀虫蛋白含量的时空表达及对亚洲玉米螟的杀虫效果. 中国农业科学, 37(8): 1155 – 1159]

Wu XY, Huang FN, Leonard BR, Moore SH, 2007. Evaluation of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn hybrids against Cry1Ab susceptible and resistant sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae). *Economic Entomology*, 100(6): 1880 – 1886.

Xie N, Jiang XF, Zhang L, Luo LZ, 2012. Effects of CrylAc toxin on activities of some enzymes in the larval midgut of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(2): 168 – 175. [解娜, 江幸福, 张蕾, 罗礼智, 2012. CrylAc 杀虫蛋白对粘虫中肠几种酶活性的影响. 昆虫学报, 55(2): 168 – 175]

Yun GL, Deng SD, Zhang QW, Xu HL, Cai QN, 2004. The resistance of Bt corn (MG95) to *Pseudaletia separate*. *Entomolagical Knowledge*, 41(5): 422 – 426. [贠桂玲, 邓曙东, 张青文, 徐环李, 蔡青年, 2004. Bt 玉米(MG95)对粘虫的抗性和拒食作用. 昆虫知识, 41(5): 422 – 426]

Zhang L, Jiang SJ, Jiang XF, Yang HX, Luo LZ, 2011. The influence of Cry1Ab toxin on the growth and development of *Microplitis pallidipes*. *Plant Protection*, 37(6): 107 – 111. [张蕾, 蒋善军, 江幸福, 杨海霞, 罗礼智, 2011. Cry1Ab 杀虫蛋白对淡足侧沟茧蜂生长发育的影响. 植物保护, 37(6): 107 – 111]

Zhao JM, 1962. Research of tachinid flies of Chinese armyworm. *Acta Entomologica Sinica*, 11(Suppl.): 32 – 44. [赵建铭, 1962. 中国粘虫寄蝇的研究. 昆虫学报, 11(增刊): 32 – 44]

Zwahlen C, Nentwig W, Bigler F, Hilbeck, 2000. Tritrophic interactions of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn, *Anaphothrips obscurus* (Thysanoptera: Thripidae), and the predator *Orius majusculus* (Heteroptera: Anthocoridae). *Environmental Entomology*, 29(4): 846 – 850.

(责任编辑：赵利辉)